

Рис. 1. Влияние состава раствора химического меднения на морфологию поверхности осажденных пленок меди. Соотношение соль меди: лиганд : 1:5 (а, б), 1:2.5 в-е). Лиганд тартрат (а), трилон Б (б-е). Добавки: ПАВ (з), полипропиленгликоль (д), полиэтиленгликоль (е). Длительность осаждения 10 мин, температура 40 (а) и 60 (б-е)°С

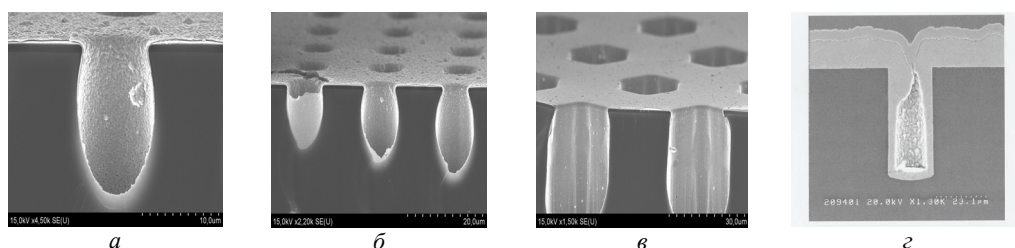


Рис. 2. ЭМ снимки сколов отверстий в кремниевых подложках с трехслойным покрытием: Ni-P—Ni-W-P—Cu. Медь осаждалась из трилонатного раствора с добавками бипиридила и ПАВ (а,б), бипиридила и полипропиленгликоля (в) при 60°С, тартратного (г) раствора без добавок при 40°С

## ИЗМЕНЕНИЕ ВРЕМЕННОЙ СТРУКТУРЫ ИОННЫХ ПУЧКОВ ПРИ ПРОХОЖДЕНИИ ЧЕРЕЗ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ КАПИЛЛЯРЫ

А. И. Урбанович

Белорусский государственный университет,  
факультет прикладной математики и информатики, urbanovich@bsu.by

Транспортировка ускоренных ионных пучков через диэлектрические капилляры дала возможность получать ионные пучки малого поперечного сечения с небольшой расходимостью [1]. Процесс формирования ионного пучка в капилляре существенно зависит от многих факторов. Среди причин, приводящих к различным изменениям в структуре пучка, можно выделить четыре. Это явления, возникающие при вхождении ионного пучка в капилляр; процессы, происходящие в самом пучке; эффекты, возникающие в результате взаимодействия ионного пучка со стенками капилляра и,

наконец, явления, возникающие при выходе пучка из капилляра. Степень влияния каждой из названных причин существенно зависит, как от параметров потока ионов, входящих в капилляр, так и от вещества, из которого он изготовлен и его геометрии (цилиндр, конус и т.п.). В настоящее время используются капилляры, изготовленные из диэлектрических материалов, полимеров, полупроводников, металлов и др. Результаты экспериментальных работ [2-4], в которых исследовались процессы взаимодействия ускоренных атомарных ионов водорода с поверхностью цилиндрических и конических стеклянных капилляров методом измерения временных и угловых распределений ионов, прошедших через капилляры, свидетельствуют о том, что в случае, когда диаметр ионного пучка больше входного отверстия капилляра, имеет место эффект преобразования непрерывного пучка протонов в пульсирующий. Это означает, что формы временных огибающих зависимостей количества ионов, прошедших через капилляр, имеют вид последовательности импульсов, причем для конусного капилляра частота следования импульсов за один и тот же временной интервал значительно больше, чем для цилиндрического капилляра, а длительности импульсов намного меньше [3]. Авторы работы [5] объяснили наблюдавшийся эффект преобразования непрерывного ионного пучка в пульсирующий изменением заряд торца капилляра за счет токов утечки. Описать этот эффект можно следующим образом. При вхождении широкого пучка протонов в капилляр на передней стенке капилляра накапливается объемный заряд  $\rho_k(t)$ . Если плотность тока  $\vec{j}$ , то изменение заряда подчиняется уравнению непрерывности:

$$\frac{\partial \rho_k}{\partial t} + \operatorname{div} \vec{j} = 0. \quad (1)$$

Учитывая, что  $\vec{j} = \gamma \vec{E}$ , а  $\operatorname{div} \vec{E} = \rho_k / \varepsilon_0$ , где  $\gamma$ ,  $\vec{E}$  и  $\varepsilon_0$  соответственно – проводимость вещества, напряженность электрического поля и электрическая постоянная, получаем уравнение для изменения  $\rho_k$  во времени:

$$\frac{\partial \rho_k}{\partial t} + \frac{\gamma}{\varepsilon_0} \rho_k = 0. \quad (2)$$

Решение уравнения (2) имеет вид:

$$\rho_k(t) = \rho_k(0) e^{-\frac{\gamma}{\varepsilon_0} t}. \quad (3)$$

Рассасывание этого объемного заряда с характерным временем  $\tau_x = \varepsilon_0 / \gamma$  приводит к уменьшению заряда, а значит и положительного потенциала, и часть ионов проникает в капилляр, после чего снова происходит его «запирание». Оценки показывают, что для боросиликатного стекла, из которого изготавливались капилляры, проводимость  $\gamma = 10^{-11} - 10^{-12} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$ , а значит, характерное время  $\tau_x \approx 1 - 10 \text{ с}$ .

Фактически  $\tau_x$  можно считать периодом осцилляций числа протонов на выходе из капилляра. В экспериментальной работе [5] торец капилляра покрывали тонкой металлической пленкой, и осцилляции числа протонов после прохождения капилляра исчезали. У металлической пленки проводимость  $\gamma \approx 10^7 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$ , а значит  $\tau_x \approx 10^{-17} \text{ с}$ . Это означает, что появляющийся на торце, покрытом тонкой пленкой металла, объемный заряд, практически мгновенно рассасывается «не запирая» входящий пучок протонов. Использование такой простой модели дает неплохое согла-

сие с экспериментом, проведенным в работах [2-4]. В конусном капилляре ионы взаимодействуют со стенками капилляра также сообщая им положительный заряд, плотность которого, однако, зависит уже и от времени, и от продольной координаты, что приводит к более сложной временной зависимости переданных капилляром ионов. В случае, когда диаметр входного пучка был меньше входного отверстия капилляра, эффект пульсации не наблюдался [3].

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Nebiki, T.* Focusing of MeV ion beams by means of tapered glass capillary optics/ T. Nebiki [et.al.] // J Vac. Sci. Technol. 2003. Vol. A 21(5). P. 1671-1674.
2. *Комаров, Ф.Ф.* Угловые распределения протонов с энергией 240 кэВ, прошедших диэлектрические капилляры // Ф.Ф. Комаров, А.С. Камышан, А.Е. Лагутин // Изв. РАН. Сер. физ. 2008. Т. 72. №5. С. 680-682.
3. *Комаров, Ф.Ф.* Прохождение ускоренных протонов через диэлектрические микро- и нанокapиллярные структуры / Ф.Ф. Комаров, А.С. Камышан, В.В. Пилько // Доклады НАН Беларуси. 2010. №6. С. 73-76.
4. *Komarov, F.F.* A fine structure in angular distributions of protons transmitted through insulating capillaries / F.F. Komarov, A.S. Kamyshan, Cz. Karwat // Vacuum. 2009. Vol. 83. P. 51-53.
5. *Комаров, Ф.Ф.* Фокусирование ионных пучков конусным диэлектрическим капилляром / Ф.Ф. Комаров, А.С. Камышан, Я.Партыка // Материалы 8-й Международной конференции «Взаимодействие излучений с твердым телом» (Минск, 23-25 сентября 2009г.). С. 32-33.

### ФОНОННАЯ ДИНАМИКА И ПРОЦЕССЫ ФОРМИРОВАНИЯ НАНОДОМЕНОВ В ТОНКИХ ПЛЕНКАХ РЕЛАКСОРОВ

**А. В. Филимонов, С. Б. Вахрушев**

---

*Санкт – Петербургский государственный политехнический университет,  
filimonov@rphf.spbstu.ru*

*Физико – технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, s.vakhrushev@mail.ioffe.ru*

Тонкопленочные сегнетоэлектрики интересны как с прикладной, так и с чисто научной точки зрения. Среди перспективных применений можно указать электрооптические элементы, микроскопические электромеханические сенсоры. В последнее время значительное внимание уделяется возможности интеграции тонкопленочных сегнетоэлектриков в металл - полупроводниковые наногетероструктуры в качестве пассивных (диэлектрические прослойки) и активных (сегнетоэлектрическая память) элементов [1]. Также тонкопленочные сегнетоэлектрики являются составляющими элементами магнито-электрических композитов, на основании которых планируется создание концептуально нового типа энергонезависимой памяти с высокой плотностью записи [2]. Особый интерес привлекают эпитаксиальные пленки, которые обладают существенно лучшими характеристиками по сравнению с поликристаллическими.

Изучение фононных дисперсионных кривых в кристаллах ведется уже более полувека методом неупругого рассеяния нейтронов (НРН) и около 15 лет методом неупругого рассеяния синхротронного излучения (НРСИ). Эти методы позволяют экспериментально определить дисперсионные зависимости элементарных возбуждений исследуемого материала во всей зоне Бриллюэна. До недавнего времени методы неупругого рассеяния применялись только для исследования объемных образцов – применение рассеяния нейтронов для изучения структур меньшей размерности затруднено большой глубиной их проникновения в твердые тела, а использованию